Internationales Symposion
INTERPRAEVENT 1996 – GARMISCH-PARTENKIRCHEN
Tagungspublikation, Band 2, Seite 223 – 232

EFFETS ANTHROPIQUES SUR L'EQUILIBRE DES COURS D'EAU

ANTHROPICS EFFECTS ON THE EQUILIBRIUM OF RIVERS

Dr. J.-L. BOILLAT, Ph. LAZARO

Résumé: Toute modification du régime hydrologique, résultant de changements d'origine anthropique et/ou climatique, a une incidence directe sur l'équilibre des cours d'eau naturels et, par conséquent, sur les ouvrages qui y sont implantés. La démarche habituelle de dimensionnement de ces ouvrages tels que prises d'eau, ponts,.., basée sur une modélisation stationnaire à géométrie fixe, n'est dès lors plus applicable. Une nouvelle approche basée sur la modélisation transitoire à fond mobile, doit être considérée pour évaluer l'impact du changement hydrologique. Le présent article propose un concept d'analyse et de résolution adapté à cette problématique. Son application à une hypothèse de changement climatique permet de montrer les conséquences qui en résultent sur la tendance évolutive d'un cours d'eau.

Abstract: Every modification of the hydrologic conditions as a result of anthropic effects and/or climate changes has a direct effect on the equilibrium of natural rivers and consequently on the related civil works. The usual dimensioning approach for such structures as water intakes, bridges, etc..., based on a stationary modelling with fixed geometry, can therefore no longer be used. A new approach to the problem, based on transient modelling has to be considered to quantify the impact of the foreseen hydrologic change. The present article proposes an analysis and resolution method adapted to this problem. Its application to a climate change assumption allows one to show the resulting evolution tendency of a natural river.

1. Introduction

Toute modification du régime hydrologique, résultant de changements climatiques d'une part et de changements d'occupation du sol d'autre part, a une incidence directe sur la structure des crues. Ce processus de réaction en chaîne se prolonge ensuite sur l'équilibre des cours d'eau naturels par des actions d'érosion ou d'alluvionnement. Ces effets peuvent être associés à des événements particuliers (crues), à des comportements saisonniers (fluctuations cycliques) ou à une tendance à plus long terme (tendance). Dans ce processus évolutif, la méthode habituelle de dimensionnement des ouvrages liés à l'écoulement, basée sur une modélisation stationnaire, n'est plus applicable. La simulation continue en régime transitoire doit alors être considérée pour quantifier l'impact des modifications pressenties. Cette approche prospective permet également de valider les actions préventives susceptibles de maintenir l'état d'équilibre des lits naturels et d'assurer la sécurité des constructions riveraines ou traversantes.

2. Approche méthodologique

La démarche proposée ici a pour but d'évaluer l'effet de modifications hydrologiques sur l'équilibre hydraulique des cours d'eau. Elle permet de prévoir et de quantifier l'évolution morphologique du lit, ainsi que ses conséquences sur la ligne d'eau, sur la fréquence des débordements et, en corollaire, sur le fonctionnement et la pérennité des ouvrages concernés (prises d'eau, ponceaux, ponts, bassins de rétention,...) dont la conception repose sur l'hypothèse d'un lit stable (SINNIGER & HAGER, 1989).

L'approche méthodologique, schématisée à la figure 1, diffère selon que le cours d'eau se trouve ou non en état d'équilibre initial. Celui-ci correspond par définition à un bilan de masse où la quantité des sédiments entraînés est égale à celle des sédiments apportés (JAEGGI, 1992), (VANONI, 1975), (LARRAS, 1972) et (BOUVARD, 1984). Ce concept d'équilibre fait intervenir d'une part la nature des sédiments constituant le lit et la disponibilité des matériaux d'apport, d'autre part la capacité de transport de l'écoulement. Les corrections de rivières reposent traditionnellement sur une interprétation rationnelle de toutes ces caractéristiques, auxquelles il convient d'ajouter dès lors, celle de l'évolution pressentie du comportement hydrologique.

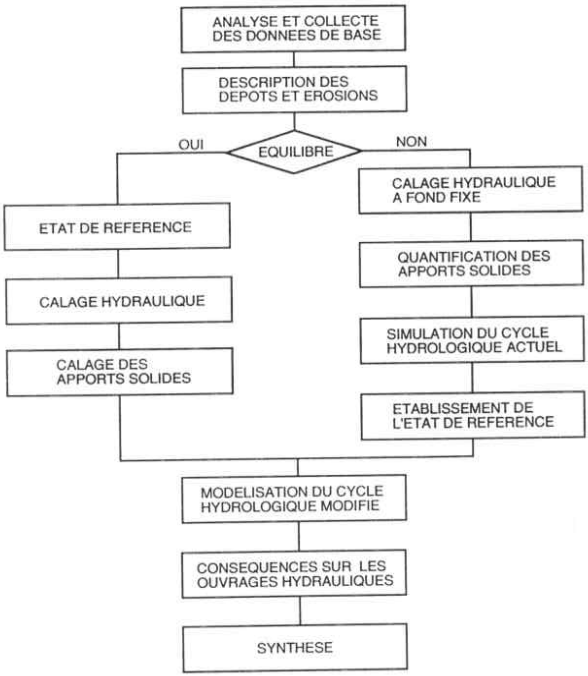

Fig. 1: Schéma de l'approche méthodologique.
Fig. 1: Methodological approach scheme.

Lorsque le cours d'eau se trouve en état d'équilibre initial, la situation observée constitue un état de référence pour le calage du modèle hydraulique.

Un premier calage, effectué par une modélisation à fond fixe sans apports solides, permet de déterminer la rugosité du lit à partir de lignes d'eau observées. L'hypothèse du lit fixe se justifie ici par le fait qu'il ne varie pas de manière significative au cours du temps.

Un deuxième calage, avec lit mobile, est destiné à quantifier la relation existant entre les débits liquides et solides. Il doit vérifier que la rivière conserve un état d'équilibre sur un cycle hydrologique pluriannuel. L'apport solide, introduit comme condition limite à l'entrée du tronçon considéré, représente la contribution du bassin versant amont.

Le modèle hydraulique ainsi calé permet de simuler le cycle hydrologique modifié et d'évaluer ses effets par rapport à l'état de référence.

L'approche est différente lorsque le cours d'eau est en phase évolutive. Dans ce cas, le calage hydraulique à fond fixe reste valable pour la détermination du coefficient de rugosité. Il repose sur l'hypothèse que le lit ne varie pas de manière significative sur le court terme.

La quantification des apports solides est obtenue en faisant référence à un état d'équilibre local ou antécédent. Cela implique l'identification d'un tronçon stable ou la possession d'informations historiques précises sur une situation d'équilibre antérieur.

L'étape suivante consiste à définir l'état de référence global du cours d'eau. Celui-ci est obtenu par simulation du cycle hydrologique actuel jusqu'à obtention de l'état d'équilibre. A partir de cet état de référence, la simulation du cycle hydrologique modifié permettra d'évaluer les effets induits sur le lit initial.

3. Modélisation

Modélisation hydrologique

Cette modélisation s'effectue en deux étapes:

La première traite de la modification du cycle hydrologique sous l'influence de changements d'origine anthropique et/ou climatique. Cette étape repose sur la génération de scénarios prévisionnels. L'évolution considérée peut concerner directement la pluviométrie et/ou l'occupation du sol. La transformation pluie-débit est obtenue à l'aide d'un modèle hydrologique déterministe de simulation continue GR3 (BEROD, 1988). Cette première étape n'est pas développée dans le présent article.

La deuxième étape traite de la désagrégation des séries de débits journaliers en séries à pas de temps plus fin. Les séries pluviométriques de longue durée sont généralement disponibles sous forme de valeurs moyennes journalières. Les débits calculés par simulation à partir de ces données ont par conséquent le même pas de temps. Ce dernier est généralement insuffisant lorsqu'il s'agit d'examiner les problèmes d'érosion ou d'inondation. Il s'agit dès lors de reconstituer une structure plus fine d'évolution des crues. La transformation recherchée poursuit un double objectif, d'une part de représenter les pointes d'hydrogrammes auxquelles le transport solide est étroitement lié, d'autre part de satisfaire les critères de stabilité numérique, imposés par la simulation hydraulique en régime transitoire.

L'approche proposée par DESAGREG (ESSYAD, 1995) est basée sur le principe du l'hydrogramme unitaire. La forme analytique de ce dernier est constituée de la superposition de deux fonctions sinusoïdales de puissance 4. La première de période 3 jours et d'amplitude proportionnelle au débit journalier reproduit de manière continue les réactions lentes du bassin versant. La seconde, destinée à reproduire les pointes de crues, a une période de 1 jour et une amplitude proportionnelle à la moyenne des différences avec les débits journaliers précédent et suivant. Le coefficient de proportionnalité est obtenu par calage sur une série d'événements observés.

Modélisation hydraulique

Le calcul hydraulique et du transport solide est effectué à l'aide du modèle SEDRIV (ZECH & HARTZELL, 1994). Ce modèle numérique filaire permet la simulation continue de l'écoulement d'un mélange eau-sédiments sur fond mobile en régime non stationnaire. Les équations du bilan de masse et de la quantité de mouvement du mélange sont couplées dans leur résolution par le schéma de différences finies linéaire implicite de PREISSMANN.

L'effet de la rugosité variable est pris en compte et un éventail de formules de transport solide est disponible dans le modèle, autorisant son utilisation sur une large gamme de conditions naturelles pour les écoulements en rivière.

Ce programme a été développé au Laboratoire de recherches hydrauliques de l'EPFL sous l'appellation FCM (CORREIA, 1994). Après une phase de validation (BOILLAT & DIVET, 1992) il a été amélioré en 1993-94 (ZECH, 1994) sous le nom de SEDRIV.

4. Application

L'approche décrite ci-dessus a été appliquée à un cours d'eau fictif dont les caractéristiques hydrologiques et morphologiques sont caractéristiques d'une rivière du plateau Suisse, à l'exemple de la Broye entre Payerne et le lac de Morat.

Etat de référence

Pour déterminer l'influence de modifications hydrologiques sur la stabilité du lit, il est nécessaire de définir préalablement un état de référence. Celui-ci a été obtenu en simulant une longue période hydrologique dans le cours d'eau initial jusqu'à obtenir un lit stable. La quantification des apports solides (relation Qs-

Q) est basée sur une formule de transport solide (SCHOKLITSCH) appliquée à une section où l'équilibre est admis. La série hydrologique utilisée a été générée par le modèle GR3 à partir des pluies mesurées à la station de Payerne, puis désagrégée à pas de temps de 30 minutes à l'aide du programme DESAGREG.

L'état d'équilibre calculé par SEDRIV, après simulation de 60 années hydrologiques, est illustré à la figure 2.

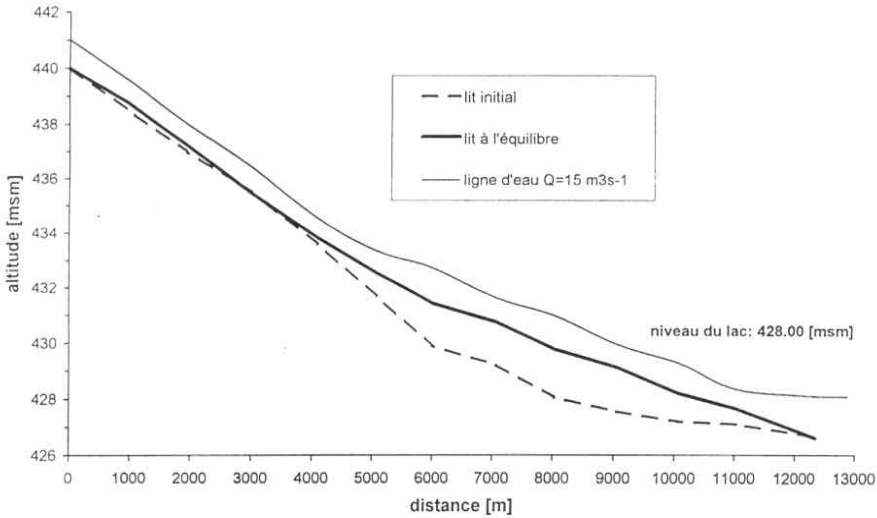

Fig. 2: Cours d'eau fictif de la Basse Broye, état d'équilibre atteint après simulation d'une série hydrologique de 60 années.

Fig. 2: Imaginary river of the Basse Broye, equilibrium state reached after a 60 year hydrologic simulation period.

Etat modifié

La modification du cycle hydrologique examinée ici repose sur une interprétation de l'hypothèse de BENISTON (1992), proposant une augmentation de 10% du volume des pluies en hiver et une diminution équivalente en été. Une grande variété de séries pluviométriques compatibles avec cette hypothèse de travail a été générée à l'aide d'un modèle statistique (OVERNEY et al., 1996). La transformation des pluies en séries de débits a ensuite été réalisée à l'aide de la fonction de production du modèle hydrologique déterministe GR3 (BEROD,1988). Les résultats obtenus montrent que le régime hydrologique annuel n'est pas significativement modifié par le

changement climatique proposé. Dans l'optique d'une étude de sensibilité, 4 scénarios présentant une même tendance ont été considérés. Ils se caractérisent par des courbes de débits classés supérieures à celle de la situation actuelle, dans la gamme des forts débits. Les courbes des débits classés correspondant à ces 4 scénarios sont représentées à la figure 3.

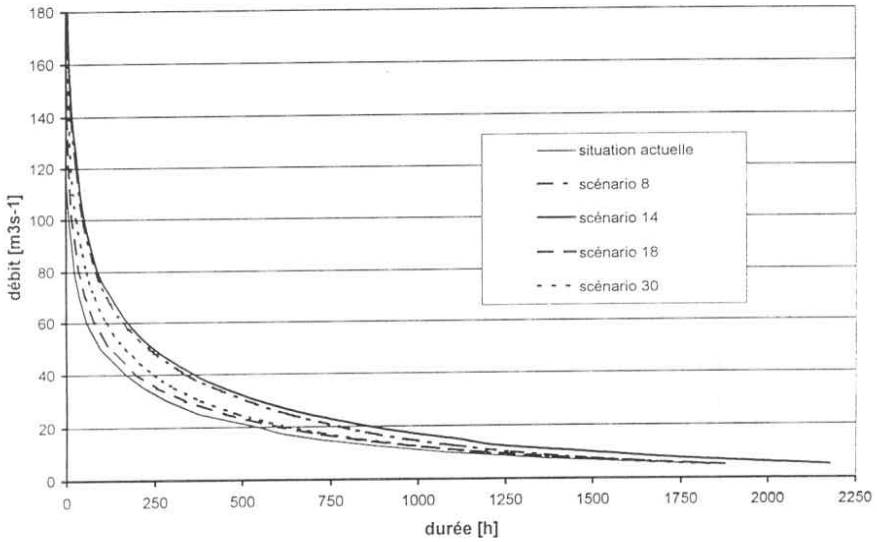

Fig. 3: Courbes des débits classés à Payerne pour 4 scénarios hydrologiques présentant un accroissement de durée dans la gamme des forts débits.

Fig. 3: Flood frequency at Payerne for 4 hydrologic conditions presenting an increase of the duration of flood discharge.

A partir de l'état de référence, les 4 scénarios de changements hydrologiques sélectionnés ont été simulés par SEDRIV.

Les résultats de la simulation obtenus avec les 4 scénarios présentent une même tendance à l'érosion, bien marquée sur toute la longueur du tronçon d'étude. L'exemple du scénario 8 est illustré à la figure 4 en comparaison de l'état de référence. Un état de pseudo-équilibre est atteint après une période de 5 ans environ. Le lit évolue ensuite autour d'une position moyenne dont l'écart-type calculé sur 20 ans est représenté graphiquement sur l'exemple de la figure 4.

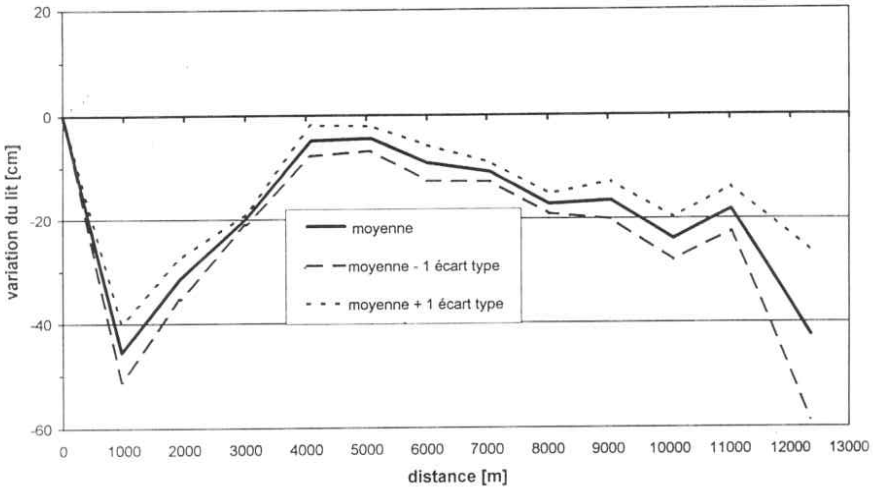

Fig. 4: Cours d'eau fictif de la Basse-Broye, évolution du lit sur 25 ans consécutive au scénario 8.

Fig. 4: Imaginary river of Basse-Broye, evolution of the river bed after a 25 year simulation with the scenario 8.

5. Conclusions

En régime hydrologique stable, un cours d'eau naturel tend à long terme vers un état d'équilibre. Une modification de ce régime, sous l'effet de changements anthropiques et/ou climatiques conduit à l'évolution du lit vers un nouvel état d'équilibre.

Les scénarios climatiques examinés ici pour un cas fictif inspiré de la Basse-Broye ont été sélectionnés parmi ceux présentant un accroissement de durée dans la gamme des forts débits. Cette modification sensible du régime hydrologique a des conséquences directes sur la stabilité du cours d'eau. Les résultats de simulations numériques montrent, dans ce cas, une tendance à l'affouillement à court et moyen termes.

Ce phénomène d'érosion représente une menace pour la stabilité des berges et des ouvrages implantés dans les cours d'eau. Il convient de citer en particulier les ponts, dont les fondations sont exposées et les prises d'eau tributaires du niveau d'écoulement.

D'autres scénarios peuvent déboucher sur un processus d'alluvionnement avec comme conséquences une réduction de capacité du cours d'eau et une augmentation de la fréquence des débordements.

Bien que la modélisation hydrologique n'ait pas permis jusqu'ici de conclure a une tendance d'évolution significative, il apparaît que tout changement du régime hydrologique se répercute à court terme sur l'équilibre des cours d'eau. La méthodologie et les outils de calcul présentés ici permettent de décrire cette évolution.

Remerciements

L'approche théorique décrite dans le présent article à été développée dans le cadre d'une étude financée par le Fonds national pour la recherche scientifique (PNR31 n° 21-36391-92; changements climatiques et catastrophes naturelles).

Références

Beniston, M. et al.: Establishment of climatological scenarios for the alpine regions, EPOCH FUTURALP (1992).

Bérod, D.: Etude d'un modèle de simulation continue, le GR3, IATE, EPF-Lausanne (1988).

Boillat, J.L., Divet, E.: Lutte contre les inondations, Le Doubs à St-Ursanne, Interpraevent, Berne (1992).

Bouvard, M.: Barrages mobiles et ouvrages de dérivation, Eyrolles, Paris (1984).

Correia, L.R.P.: Numerical modeling of unsteady flow over a mobile boundary, Thèse n° 993, EPF-Lausanne (1994).

Essyad, K.: DESAGREG: mode d'emploi, LCH, EPFL (1995).

Jaeggi, M.: Sedimenthaushalt und Stabilität von Flussbauten, VAW Mitteilung 119, ETH-Zürich (1992).

Larras, J.: Hydraulique et granulats, Eyrolles, Paris (1972).

Overney, O., Consuegra, D, Favre, A.-C., Lazaro, Ph., Boillat, J.-L.: Impact des changements climatiques sur le régime hydrologique des bassins versants et sur le comportement hydraulique des cours d'eau, PNR31 changements climatiques et catastrophes naturelles (1996).

Sinniger, R.O., Hager, W.H.: Constructions hydrauliques, TGC15, EPF-Lausanne (1989).

Vanoni, A.: Sedimentation engineering, ASCE - Manuals and reports on engineering practice - N° 54, ASCE (1975).

Zech, Y., Hartzell, U.: SEDRIV: résumé théorique et mode d'emploi, LCH, EPF-Lausanne (1994).

Dr. Jean-Louis Boillat et Philippe Lazaro
Laboratoire de constructions hydrauliques
Département de génie civil
Ecole polytechnique fédérale de Lausanne
1015 Lausanne